

工學碩士學位論文

스위치드 릴렉턴스 전동기의
특성 해석에 관한 연구

指導教授 朴 瀚 錫

이 論文을 工学碩士學位論文으로 提出함.



釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

朴 滢 範

이 論文을 朴滢範의 碩士學位 論文으로 認准함

2003年 6月

主審 工學博士 裴 鍾 一



委員 工學博士 禹 炘 一



委員 工學博士 朴 瀚 錫



목 차

1. 서 론-----	1
2. 기본 이론-----	2
2.1 SRM의 기본구조 -----	2
2.2 SRM의 회전원리 -----	3
2.3 SRM의 설계 -----	9
3. 해석 모델 및 유한요소해석-----	12
3.1 해석 모델 및 제원-----	12
3.2 유한요소해석 -----	14
3.3 전류초평-----	16
4. 해석결과 및 고찰-----	18
5. 결 론 -----	26
참 고 문 헌-----	27
ABSTRACT-----	29

제 1장 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor : SRM)는 회전 전기기계 중에서 가장 간단한 구조로 되어 있다. 권선은 고정자에만 집중권으로 감기어져 있으며, 돌극형의 회전자에는 권선이 없다. 회전자를 일정방향으로 회전시키려는 토크는 고정자의 권선에 전류가 흘러서 발생하는 자속에 회전자가 일치하려는 현상에서 생긴다.

SRM은 넓은 범위의 속도 및 토크에서 효율이 높고, 단위 체적당 토크 오크 및 출력 증가, 속도 및 토크 제어, 역방향 운전 및 회생제동이 용이하다는 장점으로 인하여 전기자동차, 전동 지게차 등에 사용되던 기존 모터들의 대용품으로 관심을 모으고 있다[1-2]. 그러나 토크 맥동이 크고 위치센서가 필요하며 진동과 소음이 심하다는 단점이 있다[3-6]. 이를 개선하기 위하여 제어 방식 및 진동 소음저감을 위한 여자방식에 대한 연구는 진행되고 있지만 전자장 수치해석 기법의 일종인 유한요소법을 이용한 특성해석에 관한 연구가 진행된 바는 아직 미비한 실정이라서 이에 대한 기술 개발이 시급한 실정이다[7-8].

본 논문에서는 SRM에 대한 특성 해석에 대하여 고찰한다. 상용 프로그램인 Maxwell Rmexpert 를 사용하여 기본설계를 하고 특성 해석을 위한 프로그램을 개발한다. 전동기의 동 특성 해석을 위하여 이동 메쉬 기법을 사용하고, 여러 가지 속도에 대한 특성을 해석한다. 드라이버 구현을 위하여 출력 전류를 궤환받아서 출력 전류가 기준 전류에 수렴할 수 있도록 표평을 적용하고, 2상 전압 제어에 의한 중첩 전류를 사용하여 토크의 성능을 향상시킨다.

제 2장 기본 이론

2.1 SRM의 기본 구조

SRM은 단돌극형과 이중 돌극형의 두가지 방식으로 분류된다. 본 논문에서는 고정자와 회전자 모두 이중돌극 구조로 되어 있는 이중 돌극형을 채택하였으며, 회전자의 정지 시 구속되는 경우를 방지하기 위하여 고정자와 회전자의 극수는 다르게 하였다. 그림 2.1은 일반적인 8/6극(고정자/회전자) SRM의 일반적인 구조를 보여준다.

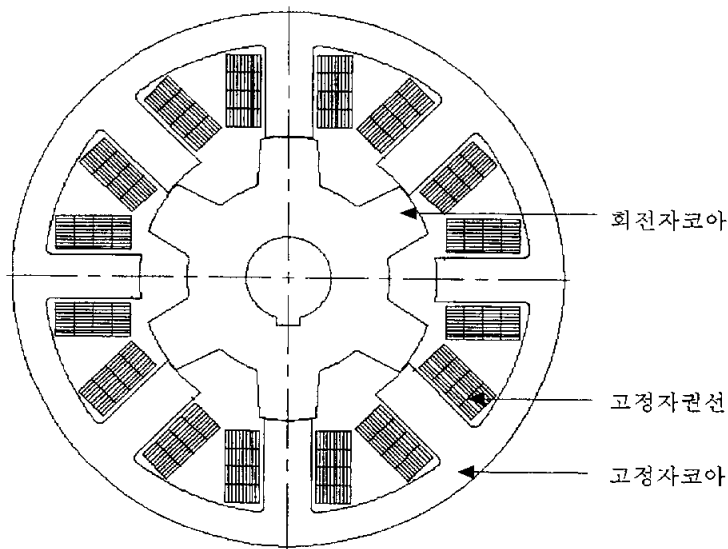


그림 2.1 8/6극 SRM의 단면도

Fig. 2.1 Moving Core Type Actuator

2.2 SRM의 회전원리

고정자 권선이 여자되면 인접한 회전자에 인덕턴스가 최대가 되려는 방향 즉, 여자된 고정자와 정렬하려는 방향으로 움직이게 되고 회전자와 고정자가 일치되기 전에 이 고정자 권선의 여자를 끊고 인접한 다음 상의 권선을 여자하게 되면 다시 회전자가 이 방향까지 회전하게 된다. 이와 같이 회전자의 위치에 따라 순차적으로 여자시켜 나가면 회전자는 한 쪽 방향으로 계속해서 회전하게 된다.

돌극 구조의 특성상 회전자의 위치에 따라 자기저항이 변하게 되므로 공극에 저장된 자기 에너지도 변하게 되어 곧 기계에너지의 변화인 코깅을 유발하게 된다. 한 상의 권선이 여자되면 에너지의 일부는 기계에너지로 전환되고 나머지는 자기에너지로 저장되거나 저항에 의한 손실이 된다. 이 권선이 감자되면서 자기 에너지는 전원측에 환원되거나 궤환 과정을 통해 기계에너지로 변하기도 하며, 저항에서 방열로 될 수도 있다. 이러한 자기에너지의 처리여부가 시스템의 특성상 중요한 문제가 된다.

이중 돌극형 SRM의 자기회로에 저장되는 에너지는 다음과 같다.

$$W_c = \frac{1}{2} i^2 L \quad (2.1)$$

여기서, i 는 권선의 상전류, L 은 인덕턴스이다.

한 상에서 발생하는 토오크는 고정자에 대한 회전자의 상대적인 각도 θ 에 비례하므로 자기에너지의 θ 에 대한 편미분인 다음 식과 같다.

$$T = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (2.2)$$

식 (2.2)에서 토오크는 전류의 제곱에 비례하고 θ 에 대한 인덕턴스의 기울기에 비례함을 알 수 있다. 즉 토오크는 전류의 방향과 무관하게 작용하며 인덕턴스의 기울기에 따라 토오크의 부호가 바뀌게 되므로 회전 방향의 반대방향으로 작용하는 부(-)토오크가 발생하는 회전자의 위치 각도가 존재한다. 즉 그림 2.2의 (a)와 같이 한상의 인덕턴스의 기울기가 회전자의 위치각 θ 에 대하여 증가 ($\theta_s \sim \theta_1$), 감소 ($\theta_2 \sim \theta_3$) 또는 일정한 구간 ($\theta_1 \sim \theta_2$)이 존재한다. 만일 그림 (b)와 같이 상권선에 일정한 여자전류가 흐르게 되면 그림 (c)와 같이 인덕턴스가 증가하는 구간 ($\theta_s \sim \theta_1$)에서는 정토오크가 발생하게 되고, 인덕턴스가 감소하는 구간 ($\theta_2 \sim \theta_3$)에서는 정토오크와 크기가 같고 방향이 반대인 부(-)토오크가 발생하게 된다. 그러므로 일정한 여자를 하면 정토오크와 부토오크는 서로 상쇄되어서 토오크는 0이 되므로 전동기는 회전할 수 없다.

그러므로 SRM은 일정한 여자는 하면 정토오크와 부토오크는 서로 상쇄하게 되어 회전하지 않으므로 반드시 회전자의 위치에 따라 스위칭 여자를 하여야 한다.

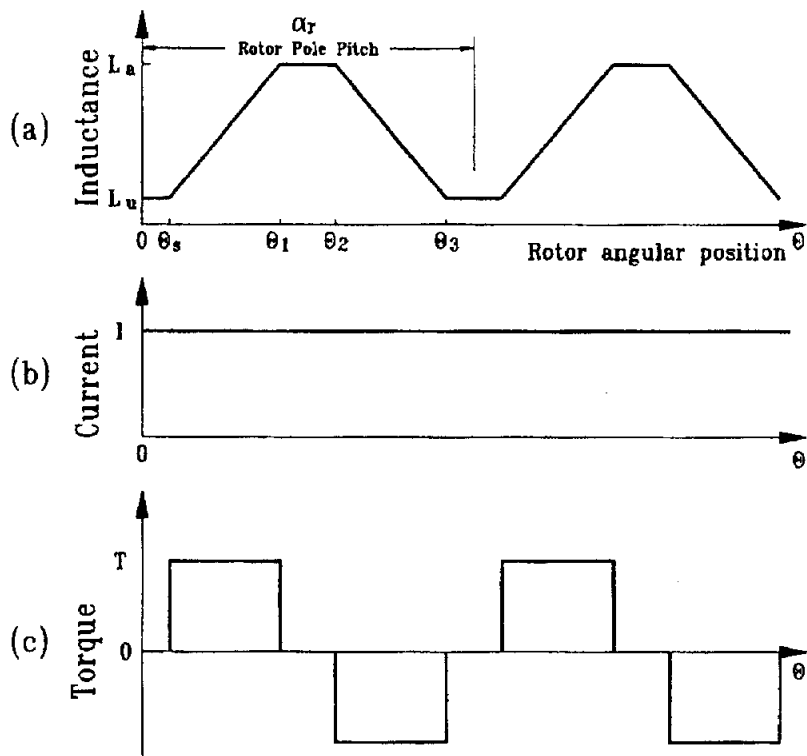


그림 2.2 일정한 여자 전류에서의 토오크

Fig. 2.2 Torque with constant exciting current

그림 2.3 에서는 3상 6/4극 SRM의 각 상에 스위칭 여자 전류를 흐르게 함으로써 이상적인 토오크를 발생시키는 3상 스위칭 여자에 대하여 보여 준다. 각 상의 여자 전류에 의하여 발생하는 토오크들의 합으로 토오크를 발생하게 되고 3상 발생 토오크는

$$T = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL(\theta-30^\circ)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL(\theta-60^\circ)}{d\theta} \quad (2.3)$$

로 된다.

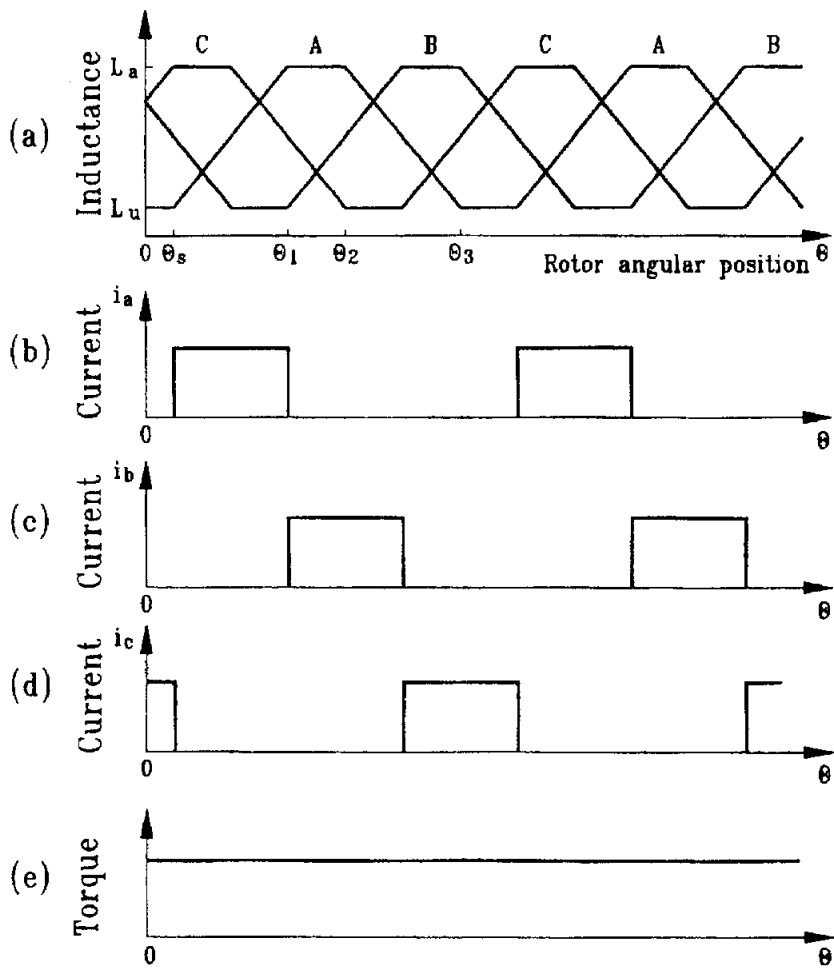


그림 2.3 스위칭 여자전류에서의 토오크 발생

Fig. 2.3 Torque with switching exciting current

한편 실제의 스위칭 여자를 하고자 할 때에는 다음의 사항들을 반드시 고려해야 한다.

① 인덕턴스 상승구간($\theta_s \sim \theta_1$)에서 스위칭 온을 행할 때 인덕턴스의 증가로 인하여 전류의 확립이 충분하지 못하므로 토오크를 내기 위한 충분한 전류의 확립을 위하여는 그 이전의 최소 인덕턴스 구간에서 스위칭 온을 해야 한다.

② 전류를 소호할 때 실제로는 전류의 소호시간이 길어지므로 부 토오크 영역 ($\theta_2 \sim \theta_3$) 이전에 어느 정도의 소호 시간을 두고서 스위칭 오프해야 한다.

2.3 SRM의 설계

1) 상수와 극수 결정

SRM은 다양한 종류의 상수와 극수의 조합을 가질 수 있다. 상수는 우선적으로 기동 토크의 산정에 관련이 있다. 고정자치와 회전자치의 조합에 있어 일단의 회전자 각도에 대해 필요한 기동토크를 구하기 위해서는 인접한 두상의 $\frac{dL}{d\theta}$ 의 증분사이에 적절한 중복이 있어야 한다. 이러한 중복은 인덕턴스가 증가하는 양끝구간의 프린징 효과에 의해 큰 영향을 받는데 이것은 모가 난 부분을 둥글게 함으로써 줄일 수 있다. 일반적으로 소형모터에서는 권선과 전력소자를 줄일 수 있으며, 결선에도 유리하며 제작에도 편리한 2상의 전동기를 사용하고 있다.

3상 전동기는 일반적으로 4상한 동작을 할 수 있으며 6/4극의 극수비가 보편적으로 적용되고 있다. 4상 8/6극의 전동기는 어떤 회전자의 위치에 서도 충분한 기동 토크를 얻을 수 있고, 토크 덩의 문제가 없게 된다. 4상 모터는 짧은 시간동안 2상을 동시에 운전할 수 있어 한번에 여러 권선을 쓴다는 측면에서 효율적인 것으로 생각할 수 있다.

2) 공극의 결정

SRM은 다른 여타의 전동기와 마찬가지로 고정자와 회전자 사이의 기계적인 접촉을 피하기 위하여 최소한의 gap이 필요하다. 특히 SRM은 소음을 줄이고 상전류의 평형을 유지하기 위해서 최대한 편심이 없도록 해야 한다. 그리고 최대 토크를 구현하고 Volt-Ampere의 조건을 최소화하기 위해 되도록 작은 공극이 필요하다. 그러나 공극이 작은 만큼 편

심에 의한 소음, 진동 등의 이상 효과가 크게 되므로 가공 기술을 적절하게 검토한 치수를 적용하는 것이 바람직하다. 일반적으로 회전자 직경의 0.5% 정도로 적용하는 것이 보통이다.

3) 극호화 형상의 결정

최적의 극호를 얻기 위해서는 여러 가지 요인들에 대해 검토하여야 한다. 그러나 기본적으로 고정자와 회전자의 극호는 거의 같아야 한다. 만일 어느 한쪽이 크다면 회전자가 정렬 위치를 중심으로 하는 토오크의 dead zone이 생기게 된다. 그림 2.3은 4상 8/6극 전동기의 고정자 극호 β_s 와 회전자 극호 β_r 사이의 모든 가능한 조합을 보여주는 삼각형이다.

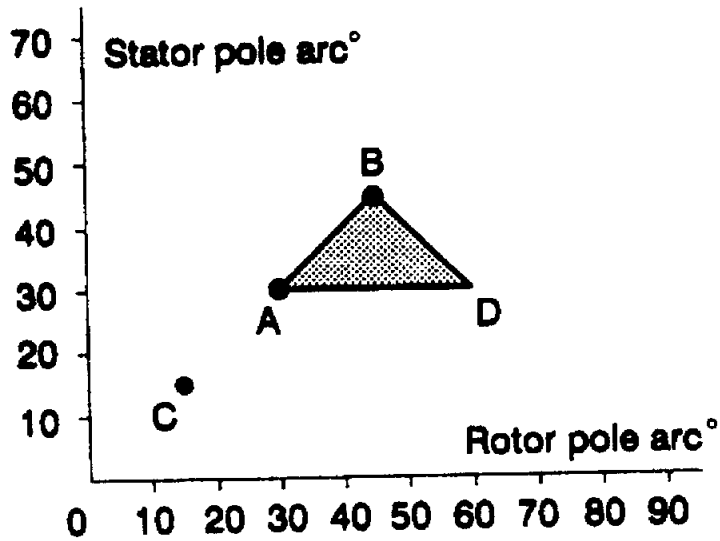


그림 2.4 4상 8/6극 SRM의 가능한 삼각형

Fig. 2.4 Feasible triangle of four phase, 8/6 poles

어떤 규칙에 따라 조합들은 삼각형의 경계 ABC 안에 있어야 한다.

제 3 장 해석 모델 및 유한요소 해석

3.1 해석 모델 및 제원

그림 3.1은 상용 설계 프로그램을 사용하여 설계한 해석 모델이며 표 1은 전기적, 기계적 제원을 나타낸다.

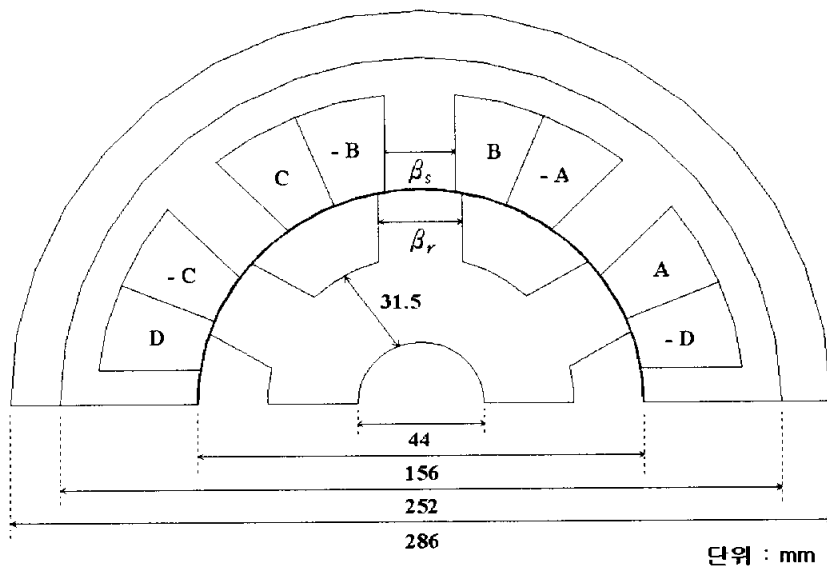


그림 3.1 해석 모델

Fig. 3.1 Analysis model

표 1 전기적, 기계적 제원

Table 1 Electrical mechanical specifications

항목	값	단위	항목	값	단위
정격출력	13.5	kW	공극길이	0.5	mm
정격전압	80	V	적층폭	157	mm
턴수	10	T/pole	코일선경	6.54	mm
고정자극수	8	Pole	고정자요크폭	13	mm
회전자극수	6	Pole	회전자요크폭	31.5	mm
기준 속도	1800	rpm	회전자극호각(β_r)	22	degree
상 수	4	-	고정자극호각(β_s)	18	degree

3.2 유한 요소 해석

SRM을 2차원 유한요소법으로 해석하기 위하여 자기 벡터 포텐셜과 전류 밀도가 Z축 방향 성분만 갖는다면 SRM의 지배방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다[10].

$$-\frac{\partial}{\partial x}(\nu \frac{\partial A}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\nu \frac{\partial A}{\partial y}) + J_0 = 0 \quad (3.1)$$

여기서 ν 는 자기 저항률이며, A 는 자기 벡터포텐셜, J_0 는 입력전류밀도를 나타낸다.

전압원에 의한 회로방정식은 식 (3.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V = R_i i_i + L_i \frac{di_i}{dt} + E_i \quad (3.2)$$

여기서, V 는 입력전압이며, i 는 각상에 흐르는 전류, R 은 각 상의 코일 및 외부회로 저항, L 은 각 상의 코일 단 누설 인덕턴스, E 는 각 상의 유기전압을 나타내며, 첨자 i 는 상 번호를 나타낸다. 식 (3.1) Galerkin법을 이용하여 정식화 하고 식 (3.2)와 결합하여 정리하면 식 (3.3)과 같은 system matrix를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [s] & [Q] \\ -\frac{1}{\Delta t}[F] & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{\Delta t}[F] & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} 0 \\ V \end{bmatrix}_{t+\Delta t} \quad (3.3)$$

동특성 해석을 수행하기 위하여 이동라인 기법이 도입되었고, 쇄교 자속은 식 (3.4)에 의해 계산된다.

$$\lambda = \int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} (V - Ri) d\theta / \omega \quad (3.4)$$

여기서, λ 는 쇄교자속, θ_{on} 은 턴온 각, θ_{off} 는 턴오프 각, V 는 공급 전압, R 은 상 저항, ω 는 각속도, i 는 순시전류이다.

자계 내에서 자성체에 작용하는 전자력은 식 (3.5)와 같이 그 자성체를 둘러싸는 표면에 대한 맥스웰 응력법(Maxwell stress tensor)을 사용하여 구할 수 있다.

$$F = \int_s \frac{\omega}{2\mu_0} [(B_x^2 - B_y^2) n_x + 2B_x B_y n_y] ds \quad (3.5)$$

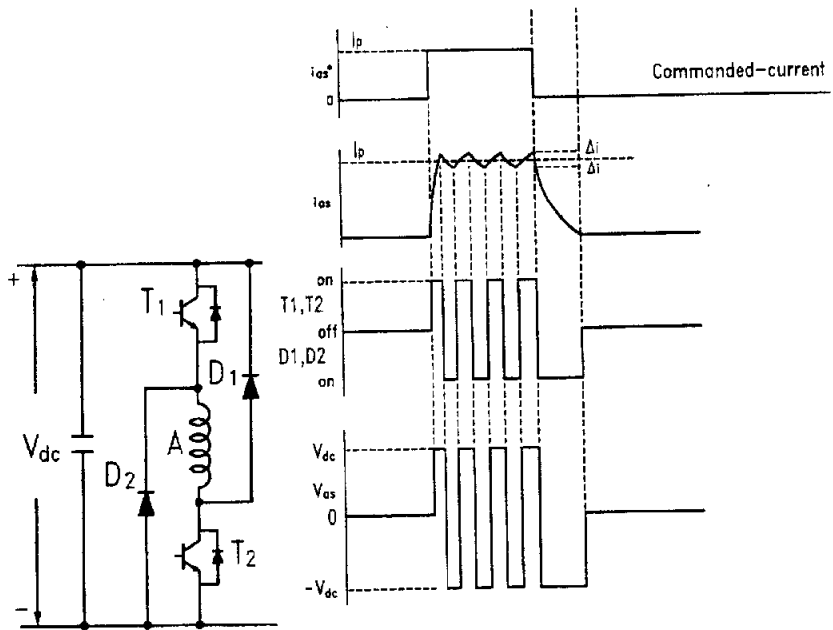
식(3.5)의 접선 방향의 힘을 구하여 식 (3.6)와 같이 토오크를 계산하였다.

$$T = F_x \cdot r \quad (3.6)$$

여기서 n_x 와 n_y 는 법선 방향의 단위벡터, ω 는 적층폭, B_x , B_y 는 자속 밀도, F_x 는 접선 방향의 힘, r 는 회전반경이다.

3.3 전류 초핑

가변속 운전과 스위치 소자를 보호하고 스위치 소자의 가격을 고려하여 전류를 초핑 전류로 제한하게 된다. 그림 3.2는 SRM을 구동하는 한 상의 스위치와 초핑 전류의 개념도를 나타낸다. 그림에서는 한 상 전류만 나타내었지만 다른 상의 전류도 마찬가지로 적용이 된다. 기준 전류를 정해놓고 출력 전류가 기준 전류보다 커지게 되면 트랜지스터 스위치를 off 상태로 하여 출력 전류를 낮추게 하고, 출력 전류가 기준 전류보다 작아지면 다시 트랜지스터 스위치를 on 상태로 하여 출력 전류를 높이게 하여 기준 전류에 출력 전류가 일치하게 제어한다. 본 모델에서는 기준 전류를 300[A]로 하였다.



(a) one phase switch

(b) Current control

그림 3.2 한 상 스위치 및 전류 제어

Fig. 3.2 One phase switch and current control

제 4 장 해석 결과 및 고찰

그림 4.1은 해석 모델의 요소 분할도를 나타낸다. 분할된 요소는 삼각형 요소이며 절점 개수는 2454 이고 요소 개수는 4866 이다.

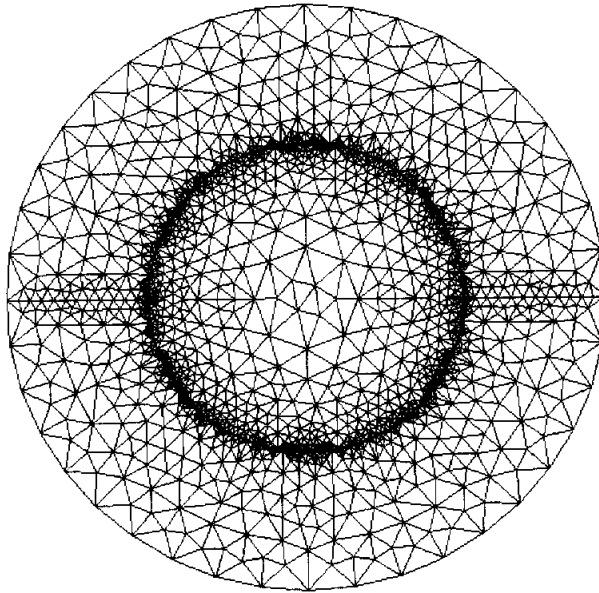
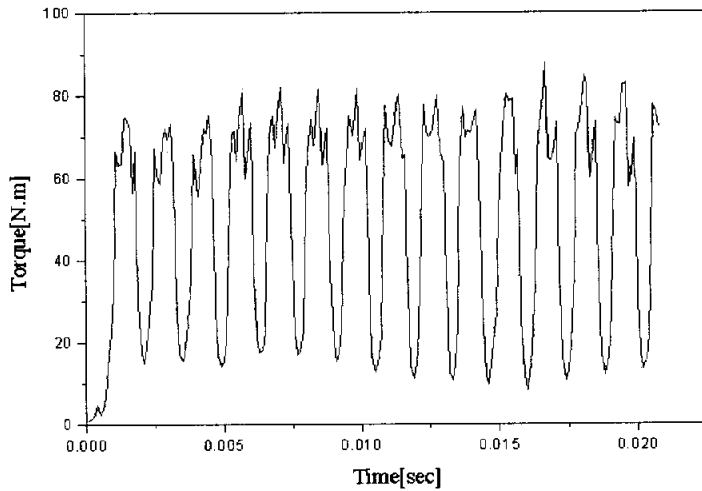


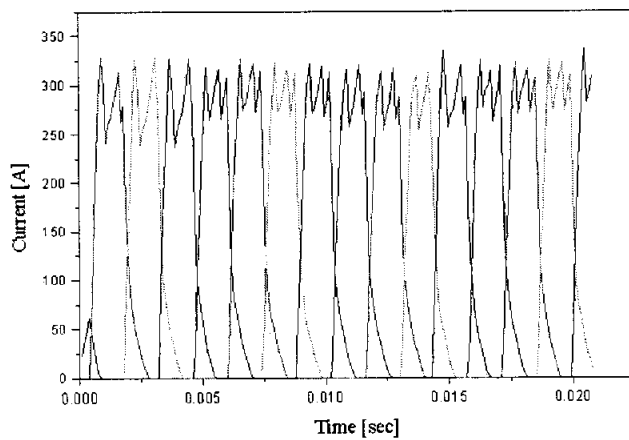
그림 4.1 요소 분할도

Fig. 4.1 Mesh shape

그림 4.2는 SRM을 기준 전압과 기준 속도를 회전시켰을 경우의 토오크 및 전류 파형이다. SRM의 특성에서 나타나는 토오크 리플 특성이 토오크 특성에서 알 수 있고 출력 전류가 기준 전류에 수렴함을 알 수 있다.



(a) Torque characteristics



(b) Current characteristics

그림 4.2 토오크 및 전류 특성

Fig. 4.2 Torque and current characteristics

그림 4.3은 형상 변화 전의 토오크 파형을 각 상별로 나타내었다. 한 상의 토오크 영역을 세 부분으로 나누었다. 중첩 전까지의 토오크 발생영역을 I, 인가 전류가 턴 오프 될 때까지의 영역을 II, 전류가 소호되면서 발생하는 토오크 영역이 III이다. 최대 토오크 리플이 발생하는 곳의 토오크를 T_{min} 이라면 토크 리플이 발생하는 곳과 관련된 영역은 I,III 영역이다. 이 중에서 I 영역의 토오크를 변화를 줌으로써 T_{min} 값을 올려서 토오크 리플을 줄일 수 있다. I 영역의 토오크를 변화를 주기 위해서 2상 전압 제어법을 사용한다.

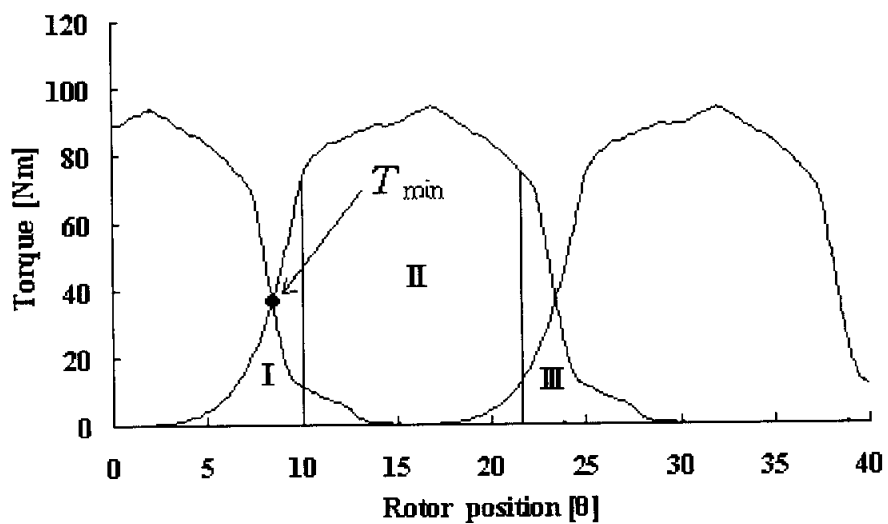


그림 4.3 초기 모델의 각 상에 대한 토오크 파형

Fig. 4.3 Torque waveform of initial model

그림 4.4는 일반적인 제어 신호와 2상 제어 신호 파형을 보여준다. 그림에서처럼 일반적인 제어 신호를 A상 전압 신호가 off가 되었을 때 B상 전압 신호가 on 이 되지만 2상 전압 제어에서는 A상 전압 신호와 B상 전압 신호가 중복이 됨을 알 수 있다.

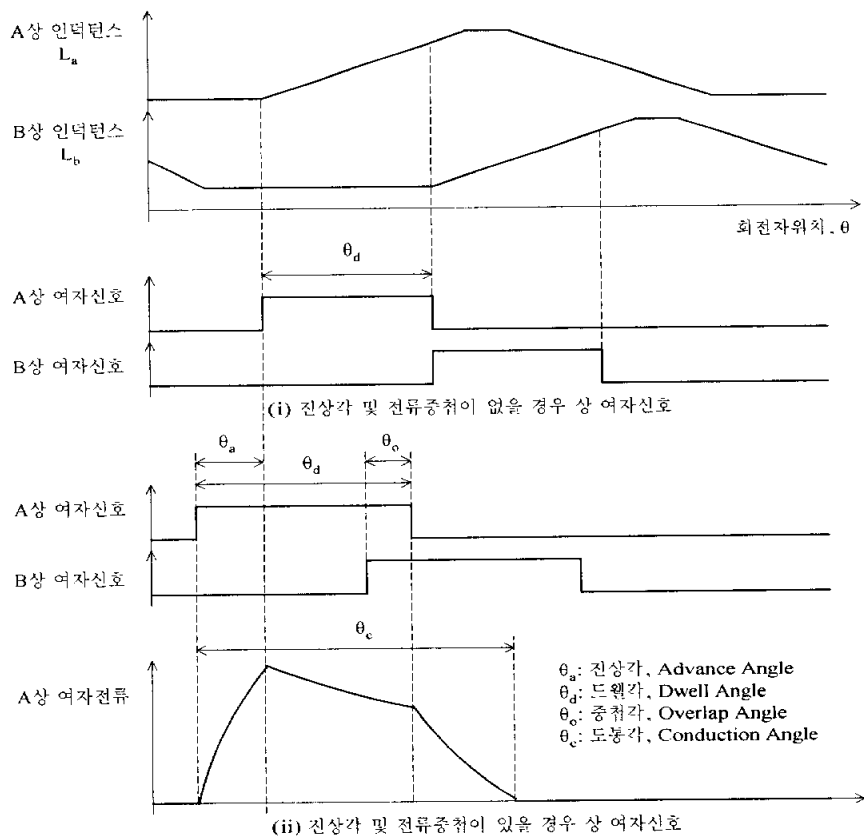
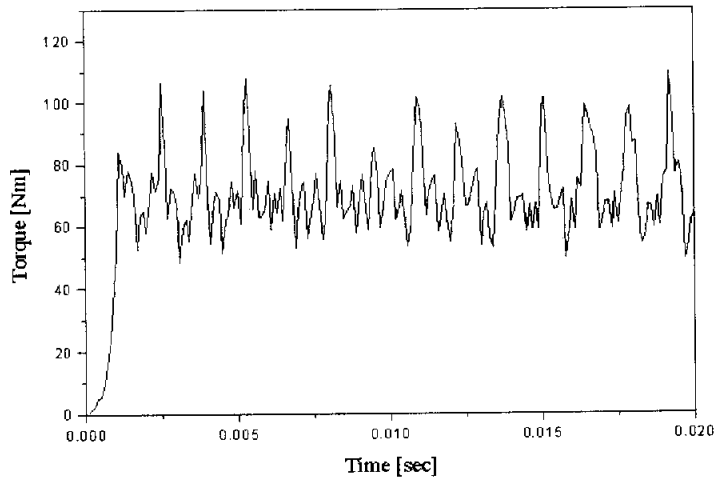


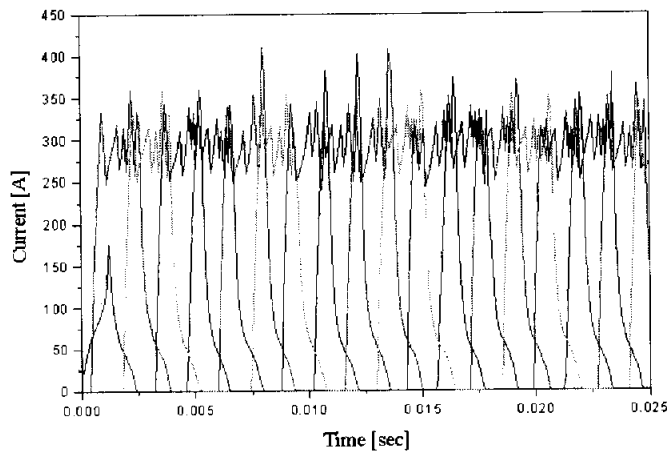
그림 4.4 SRM의 여자 신호

Fig. 4.4 Exciting signal of SRM

그림 4.5는 SRM에서 발생하는 토오크 리플을 줄이기 위하여 2상 전압 제어를 적용하였을 경우의 토오크 및 전류 특성이다. 2상 전압 제어를 적용하지 않았을 경우의 파형과 비교하여 토오크 리플이 많이 줄어들었음을 확인할 수 있다.



(a) Torque characteristics

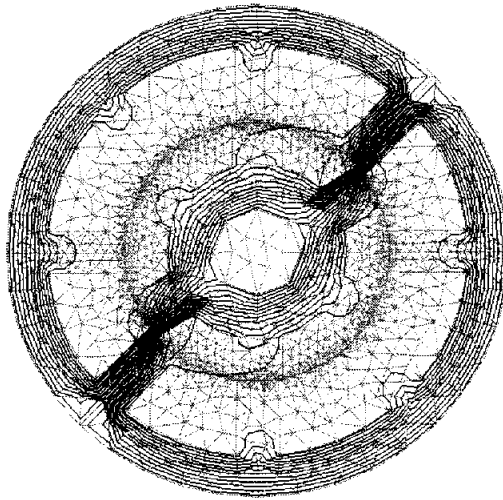


(b) Current characteristics

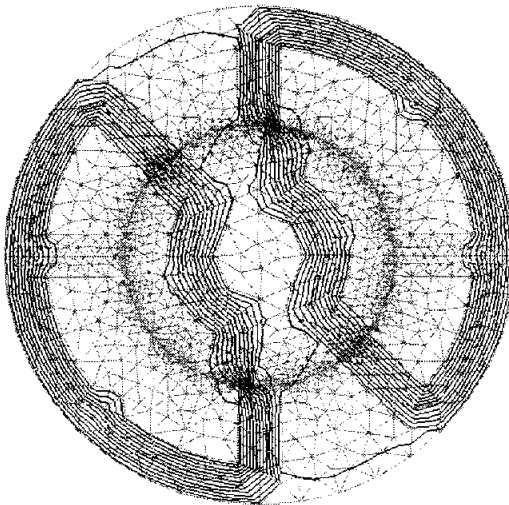
그림 4.5 2상 전압 제어 시의 토오크 및 전류 특성

Fig. 4.5 Torque and current characteristics at 2 phase voltage control

그림 4.6은 2상 전압 제어를 행할 경우의 SRM의 초기 자속 선도와 45° 를 회전하였을 경우의 자속 선도를 보여준다. 자속 선도가 이상 없이 발생됨을 알 수 있다.



(a) Initial position



(b) At 45 degree rotation

그림 4.6 자속 선도

Fig. 4.6 Flux plot

5. 결 론

본 논문에서는 스위치드 릴럭턴스 전동기의 특성 해석에 대하여 고찰하였다. 상용 프로그램인 Maxwell Rmexpert 를 사용하여 기본설계를 하였고 동 특성 해석을 위한 프로그램을 개발하였다. 가변속 운전과 스위치 소자를 보호하고 스위치 소자의 가격을 고려하여 전류를 초핑 전류로 제한하기 위하여 출력 전류를 제한받아서 기준 전류와 비교하여 출력 전류를 기준 전류와 일치하도록 전류 제어법을 사용하였다. 또한 토오크 리플을 줄이기 위하여 2상 전압 제어에 의한 중첩 전류를 사용하였고, 특성 해석 결과 2상 전압 제어를 하지 않은 모델의 토오크 특성보다 리플의 감소로 인한 성능 향상을 확인하였다.

참고문헌

- [1] R. Arumugam, D. A. Lowther, R. Krishnan and J. F. Lindsay, "Magnetic Field Analysis of a SRM using a Two Dimensional Finite Element", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. MAG-21, No.5, pp. 1883-1885, 1985.
- [2] H. Moghbelli, G. E. Adams and R. G. Hoff, "Performance of 10-HP SRM and Comparison with Induction Motor", *IEEE Trans. on IA*, Vol.27, No.3, pp. 531-538, 1991.
- [3] W. F. Ray, P. J. Lawrenson, R. M. Davis, J. M. Stephenson, N. N. Fulton and R. J. Blake, "High performance SR brushless drives", *IEEE Trans. on IA*, Vol. IA-22, No. 4, pp. 722-730, 1986.
- [4] T.J.E. Miller, *Switched Reluctance Motors and Their Control*, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford, 1993.
- [5] Yasuharu Ohdachi, Yoshihiro Kawase, Yutaka Mirura and Yoji Hayashi, "Optimum Design of SRM using Dynamic Finite Element Analysis", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 33, No.2, pp. 2033-2036, 1997.
- [6] B. S Rahman and D. K. Lieu, "Optimization of Magnetic Pole Geometry for Field Harmonic Control in Electric Motors." *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 116, pp. 173-178, 1994.
- [7] Iqbal Husain, M. Ehsani, "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control," *IEEE Trans. on PE*, Vol.11, No.1, pp.91-98, 1996.

- [8] Funda Sahin, H. Bulent Ertan, Kemal Leblebicioglu, "Optimum Geometry for Torque Ripple Minimization of Switched Reluctance Motors." *IEEE Trans. on EC*, Vol. 15, No. 1, March 2000.
- [9] Y. Ozoglu, M. Garip, E. Mese, "New Pole Tip Shapes Mitigating Torque Ripple in Short Pitched and Fully Pitched SRM." *IEEE Trans. on IA*. Vol. 1, No. 37, pp.43-50, 2002.
- [10] 임달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1992

A Study on Characteristics Analysis of Switched Reluctance Motor

Hyung Bum Park

*Department of Electrical Engineering Graduate School
Pukyong National University*

Abstract

This paper describes the operating characteristics of the switched reluctance motor by using the finite element method. The basic design is done by the commercial software(Ansoft RM Exprt) and the characteristic analysis of switched reluctance motor is done by own program. The moving mesh technique is used to calculate the dynamic characteristics, such as torque, speed and current. Produced current is compared to the reference current to prevent the high current. Also, the overlap current which can be obtained by two phase voltage control is used to raise the torque performance.

감사의 글

작은 것을 탐하다가 큰 것을 잃는다는 소탐대실, 중용의 도리, 겸손의 미덕과 참고, 수신제가 하여 기다리면 기회가 온다는 진리를 깨닫게 해주신 박한석 지도 교수님께 충심으로 감사를 드립니다. 본 논문의 심사에서 충고와 격려를 해주시고 자세하게 지도하여 주신 배종일 교수님, 우경일 교수님 그리고 그동안 가르침을 주신 전기공학과 모든 교수님께도 감사를 드립니다.

본 논문이 완성되기까지 물심양면으로 많은 도움을 주신 박성수 선배님, 이정하 선배님, 최경용 후배님, 김재곤 후배님 그리고 전기기계 연구실 대학원생 후배님들에게도 감사를 드립니다.

오늘이 있기까지 젊은 나이에 혼자되셨어도 훌륭하게 4남매를 키워주신 어머니님, 사랑하는 집사람, 사랑하는 두 아들 신건, 재성이와 함께 이 기쁨을 나누고 싶습니다.

지금까지 격려해 주신 모든 분들께 약속드립니다. 기회만을 따라다니는 인간은 절대로 되지 않겠습니다. 남을 배려하지 않는 사람도 절대로 되지 않겠습니다. 항상 언제나처럼 책을 손에서 놓지 않겠습니다.

2003. 6.

박 형 범